

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 646 542** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01T 1/36 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 19.03.2018)

(21)(22) Заявка: [2016150789](#), 22.12.2016(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.12.2016Дата регистрации:
05.03.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 22.12.2016(45) Опубликовано: [05.03.2018](#) Бюл. № 7

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: М.П. Белоусов и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. N4. С. 429-438. RU 2392642 C1, 20.06.2010. RU 2597668 C1, 20.09.2016. SU 873176 A1, 15.10.1981. US 7081626 B2, 25.07.2006.

Адрес для переписки:
620000, Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ,
Центр интеллектуальной собственности,
Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

Игнатьев Олег Валентинович (RU),
Белоусов Максим Павлович (RU),
Горбунов Максим Александрович (RU),
Морозов Сергей Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

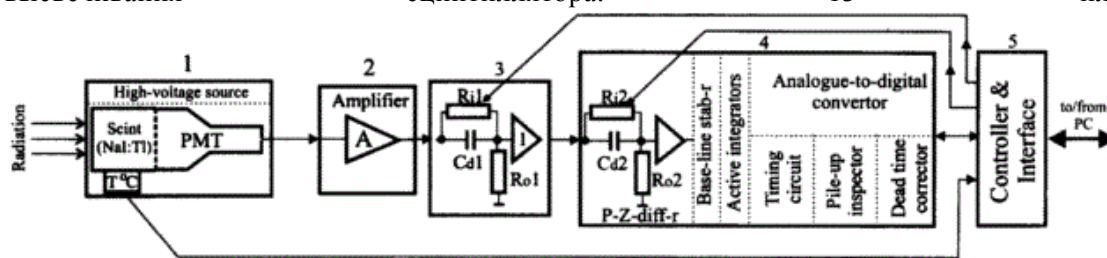
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" (RU),
Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственная компания "АТОМ Электроникс" (RU)

(54) СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

(57) Реферат:

Изобретение относится к области сцинтилляционных γ -спектрометров, точнее к спектрометрам энергий на основе сцинтилляторов NaI:Tl, CsI:Tl, CsI:Na, LaCl₃:Ce и других, характеризующихся многокомпонентными световыми вспышками с сильной зависимостью постоянных времени высвечивания от температуры кристалла. Для исключения влияния упомянутой зависимости на быстродействие спектрометра в широком температурном диапазоне в состав спектрометра, процессор детекторных импульсов которого может содержать схему укорачивания с компенсацией полюса нулем, вводятся дополнительные аналогичные схемы укорачивания с постоянными времени со стороны входов попарно равными постоянным времени подлежащих укорачиванию экспоненциальных составляющих первичного электрического импульса на выходе оптически сочлененного со сцинтиллятором фотосенсора, при этом постоянные времени со стороны выходов упомянутых схем выбираются большими, чем постоянная времени спада ближайшей более быстрой компоненты для

предотвращения образования выброса противоположной полярности, а постоянные времени со стороны входа схем укорачивания, настроенных на экспоненциальные компоненты первичного сигнала, автоматически изменяются при изменении рабочей температуры в соответствии с законами температурного изменения компонент высвечивания сцинтиллятора. 13 ил.



Фиг.10

Настоящее изобретение относится к области сцинтилляционных γ -спектрометров, точнее к спектрометрам энергий на основе сцинтилляторов NaI:Tl, CsI:Tl, CsI:Na, LaCl₃:Ce и других, характеризующихся многокомпонентными световыми вспышками.

Принцип действия любого сцинтилляционного γ -спектрометра состоит в преобразовании энергий поглощенных в сцинтилляторе гамма-квантов в относительно короткие световые вспышки с пропорциональным числом фотонов; сборе фотонов сцинтилляций на чувствительной поверхности фотосенсоров, конвертирующих световые импульсы в электрические импульсы тока; усилении и преобразовании импульсов тока в пропорциональные импульсы напряжения, жесткой привязки базовой линии спектрометра к нулю (устранение дрейфа и флуктуаций исходного уровня); придании детекторным импульсам заданной формы (с помощью аналогового или цифрового формирователя); выявлении и отбраковке импульсов, чьи амплитуды искажены взаимными наложениями во времени и коррекции просчетов (коррекции мертвого времени); преобразовании амплитуд отобранных импульсов в цифровые коды, сортировке этих кодов и построении аппаратных энергетических спектров измеряемых излучений; компенсации температурных вариаций световых выходов сцинтиллятора. Пики в аппаратном спектре отражают энергии зарегистрированных γ -квантов, а их площади - содержание нуклида в пробе.

Классический сцинтилляционный γ -спектрометр (фиг. 1) [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль V. 15 (2011) №4. с. 429-438] содержит: детектирующий модуль 1, состоящий из оптически соединенных неорганического сцинтиллятора (чаще всего NaI:Tl) и вакуумного фотоэлектронного умножителя (PMT), а также высоковольтного источника питания фотоумножителя (High voltage source) и датчика температуры сцинтиллятора (для использования при температурной стабилизации шкалы спектрометра); линейный усилитель 2; процессор детекторных импульсов 3, включающий в себя схему дифференцирования с "компенсацией полюса нулем" (P-Z-differentiator); стабилизатор базовой линии (Base-line stabilizer), две или три секции активных интеграторов (Active integrators), аналого-цифровой преобразователь (Analogue-to-digital converter - ADC), устройство таймирования (временной привязки) к спектрометрическим импульсам (Timing circuit), инспектор наложенных импульсов (Pile-up inspector) и корректор "мертвого" времени спектрометра (Dead time corrector); контроллер с интерфейсом 4 (Controller & Interface) для управления процессором детекторных импульсов и двусторонней связи с компьютером.

Структуры сцинтилляционных спектрометров могут незначительно отличаться от показанной на фиг. 1. Так вместо вакуумного фотоэлектронного умножителя (PMT) могут применяться полупроводниковые фотосенсоры - кремниевые фотодиоды (PhD), лавинные фотодиоды (APhD) или кремниевые фотоумножители (SiPM). PhD не имеют внутреннего усиления числа образованных носителей электрического заряда (электронов и дырок), а усиление в APhD лежит в пределах 50-100 раз (для PMT и SiPM усиление может достигать 10^6 раз). Если вместо PMT применяются PhD или APhD, то между выходом фотосенсора и входом линейного усилителя включают низковольтный зарядочувствительный предусилитель (ChA) для компенсации отсутствия или малого собственного усиления этих фотосенсоров. Применение ChA в иных случаях крайне нежелательно, т.к. из-за длинных фронтов импульсов, образующихся при интегрировании импульса тока зарядочувствительным предусилителем, точная временная привязка к ним всегда затруднительна.

Сцинтилляционные вспышки имеют вид одной или суммы нескольких спадающих во времени экспонент с крутым ($0,1 \div 10$ нс) фронтом и относительно медленным

спадом [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г. 323 с.]. Постоянная времени спада световой вспышки называется постоянной времени высвечивания сцинтиллятора τ_d . Для практически применяемых неорганических сцинтилляторов τ_d лежит в пределах от 15 нс до нескольких мкс.

Важнейшей характеристикой спектрометра является энергетическое разрешение, определяемое как ширина пика полного поглощения γ -квантов с энергией E_γ на половине высоты (Full Width on Half Maximum - FWHM), а также относительное энергетическое разрешение $\eta = \text{FWHM}/E_\gamma$. Сцинтилляционные γ -спектрометры принято характеризовать и сравнивать между собой по относительному энергетическому разрешению на линии источника ^{137}Cs с энергией $E_\gamma = 662$ кэВ. Энергетическое разрешение сцинтилляционного спектрометра с PMT и SiPM имеет две главные составляющие [Moszynski M. et al. Temperature dependences of LaBr₃(Ce), LaCl₃(Ce) and NaI(Tl) scintillators. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. A 568 (2006) 739-751]: собственное энергетическое разрешение η_{int} (неоднородности сцинтилляционного кристалла) и статистическая составляющая η_{st} (вероятностный характер преобразования энергий γ -квантов в числа носителей электрических зарядов). Полное энергетическое разрешение η_{tot} получается квадратичным суммированием этих составляющих:

$$\eta_{\text{tot}} = (\eta_{\text{int}}^2 + \eta_{\text{st}}^2)^{1/2} \quad (1)$$

Первая составляющая (η_{int}) определяется материалом кристалла сцинтиллятора и технологией его выращивания. Вторая, и преобладающая, статистическая составляющая во многом зависит от того, как построен электронный тракт спектрометра. Значение η_{st} дается формулой (2):

$$\eta_{\text{st}} = 2,35/N^{1/2}, \quad (2)$$

где N - число первичных носителей электрического заряда (фотоэлектронов).

$$N = E_\gamma \cdot LY \cdot QE, \quad (3)$$

где LY - световой выход сцинтиллятора, т.е. число испущенных фотонов света на 1 кэВ энергии поглощенного γ -кванта или заряженной частицы ($LY \approx 35$ для NaI:Tl); QE - квантовая эффективность фотокатода PMT или кристалла SiPM ($QE = 0,25 \div 0,43$ для фотоумножителей Hamamatsu в области длин волн высвечивания NaI:Tl).

В спектрометрах энергий ионизирующих излучений электрической величиной, линейно связанной с поглощенной в рабочем веществе детектора энергией γ -кванта, является амплитуда импульса оптимальной (с точки зрения светосбора и быстродействия) формы, измеряемая с помощью аналого-цифрового преобразователя (ADC). Относительные флуктуации амплитуд на входе ADC будут тем меньше, чем больше фотонов световых вспышек и, соответственно, первичных электронов фотосенсора вносят свой вклад в формирование этих амплитуд. Следовательно, первое требование к сформированным импульсам - время T_{peak} достижения ими амплитудного (пикового) значения должно быть достаточно большим, чтобы сцинтилляционные вспышки к этому моменту затухали до уровня, например, $5 \div 10\%$ (сбор $95 \div 90\%$ фотонов).

Второе требование к сформированным импульсам вытекает из статистического характера распределения γ -квантов или заряженных частиц во времени и необходимости применения спектрометра в интенсивных полях излучения. Чем выше интенсивность излучения (число γ -квантов в единицу времени) и чем длиннее сформированные импульсы, тем вероятнее их взаимное перекрытие во времени и, следовательно, искажение их амплитуд. Важнейшим параметром спектрометра, характеризующим его быстродействие, является микроскопическое мертвое время T_D [Игнатьев О.В. Сравнение возможностей аналоговых и цифровых спектрометров рентгеновского излучения с полупроводниковыми детекторами. Аналитика и контроль (2006) №3-4, с. 223-232]. Оно определяется как сумма минимально возможных интервалов времени между моментами возникновения данного спектрометрического импульса, предыдущего и последующего, при которой не происходит искажение из-за наложений амплитуды V_{max} данного импульса. Для идеально спроектированного спектрометра с время-инвариантным формированием сигналов T_D просто равно сумме времен достижения максимума T_{peak} и спада импульса T_F , т.е. полной длительности T_w сформированного детекторного сигнала (фиг. 2). Длительность спадающей части сформированных детекторных импульсов T_F

обычно измеряется как время от момента максимума T_{peak} до достижения уровня 1% или 0,1% V_{max} .

Зависимость скорости накопления кодов амплитуд R_0 "очищенных" от наложений импульсов от интенсивности R_i детектируемых сцинтиллятором γ -квантов дается формулой (4):

$$R_0 = R_i / [\exp(R_i \cdot T_D)] \quad (4)$$

На фиг. 3 показана зависимость (4) для спектрометра со сцинтиллятором NaI:Tl при условиях: $\tau_d = 225$ ns; $T_{peak} = 5,92 \tau_d$; $T_w \approx 16 \tau_d$ (квазигауссово формирование на 3-х активных интеграторах с $\tau_{int} = \tau_d$). Отметим, что с ростом статистической загрузки по входу спектрометра свыше $R_i \geq R_{max}$ происходит уменьшение скорости накопления спектра из-за уменьшения числа неискаженных взаимными наложениями спектрометрических импульсов.

Таким образом, свойства сцинтилляционного γ -спектрометра будут оптимальными с точки зрения энергетического разрешения и быстродействия, если сформированные детекторные импульсы будут достигать максимума при $t = T_{peak}$ после спада сцинтилляционной вспышки до уровня 5÷10%, а время спада T_F будет удовлетворять условию (5):

$$T_F \leq T_{peak} \quad (5)$$

Эти требования достаточно легко удовлетворяются на практике, если имеется одна постоянная высвечивания сцинтиллятора τ_d , достаточно стабильная при изменении температуры. Спектрометр со структурой на фиг. 1 предназначен для применения именно в этих условиях - сцинтилляторы LaBr₃:Ce и YAlO₃:Ce, примененные в работах [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль V.15 (2011) №4. с. 429-438; Belousov M.P. et al. Scintillation spectrometer SBL-1 for the x-ray densitometer of radioactive technological solutions. Analytics and Control V. 17 (2013) №1, P. 21-26] действительно имеют по одной стабильной постоянной высвечивания τ_d (16 нс для LaBr₃:Ce и 25 нс для YAlO₃:Ce).

Многие из применяемых в коммерческих спектрометрах сцинтилляторов, например NaI:Tl, CsI:Tl, LaCl₃:Ce и другие, имеют две и более компонент высвечивания. Характерной особенностью является то, что чем медленнее компонента высвечивания, тем в большей степени ее постоянная времени зависит от температуры. Рассмотрим свойства спектрометра со старейшим и наиболее широко применяемым сцинтиллятором NaI:Tl в условиях широкого диапазона изменения температуры окружающей среды.

До относительно недавнего времени было общепринято, что сцинтиллятор NaI:Tl имеет одну стабильную постоянную времени высвечивания $\tau_d = 230$ нс [Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 3-rd Edition. New York, 1999 John Wiley & Sons, Inc. 802 p.; Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г. 323 с.]. Соответственно, при проектировании спектрометров с этим сцинтиллятором их структура и настройки создавались исходя из этого значения τ_d [Drndarevic V. et al. Amplifier with time-invariant trapezoidal shaping and shape-sensitive pileup rejector for high-rate spectroscopy. IEEE Trans, on Nucl. Sec. (1989) v. 36, №1, p. 1326-1329; Dudin S.V. et al. A fast signal processor for NaI(Tl) detectors. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 352 (1995) 610-613]. В первой работе достигнута статистическая загрузка по входу $R_i \geq 3 \times 10^5$ 1/с при $T_{peak} \approx 345$ нс $T_D \approx 575$ нс, а во второй - $R_i \geq 10^6$ 1/с при $T_{peak} \approx 225$ нс $T_D \approx 1250$ нс.

В работе [Moszynski M. et al. Temperature dependences of LaBr₃(Ce), LaCl₃(Ce) and NaI(Tl) scintillators. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. A 568 (2006) 739-751] показано, что для сцинтиллятора NaI:Tl характерны как минимум две компоненты высвечивания с очень сильными зависимостями их параметров от температуры. На фиг. 4 приведены температурные зависимости интенсивностей, а на фиг. 5 - постоянных времени высвечивания. Из приведенных зависимостей следуют выводы:

1. При построении быстродействующего спектрометра необходимо учитывать медленную компоненту высвечивания. Ее вклад в энергию световой вспышки при комнатной температуре около 20%, а постоянная времени τ_{ds} почти в 5 раз больше, чем постоянная времени основной, быстрой компоненты $\tau_{df} \approx 225$ нс.

2. Влияние медленной компоненты возрастает с понижением температуры ниже комнатной.

Реальная форма импульса тока фотокатода для сцинтиллятора NaI.Tl (без учета статистических флуктуаций и без учета сверхбыстрой компоненты, наличие которой не подтверждено другими работами) показана на фиг. 6. Там же приведена нормированная на единицу временная зависимость числа испущенных фотонов света (образованных в веществе фотокатода электронов), позволяющая оценить требуемое значение T_{peak} , при котором 90 или 95% фотонов вспышки внесут свой вклад в значение V_{max} сформированного детекторного импульса. Из графика временной зависимости числа испущенных фотонов можно сделать вывод о том, что момент измерения амплитуды должен удовлетворять условию (6):

$$T_{peak} = (1+1,25)\tau_{ds} \quad (6)$$

Сигнал, полученный после интегрирования импульса тока фотосенсора 3-мя активными интеграторами (иногда ограничиваются 2-мя) с постоянной интегрирования $\tau_{int}=\tau_{df}=225$ нс, показан на фиг. 7. Параметры этого импульса таковы: $T_{peak}=1,22\tau_{ds}$; $T_w\approx T_D=4,5\tau_{ds}$; $T_w/T_{peak}\approx 3,68$ (идеальный гауссиан характеризуется $T_w/T_{peak}\approx 2,0$). В случае отсутствия медленной компоненты высвечивания сформированный импульс был бы гораздо более симметричным, а микроскопическое мертвое время гораздо меньше: $T_{peak}=1,20\tau_{ds}$; $T_w\approx T_D=3,0\tau_{ds}$; $T_w/T_{peak}\approx 2,5$. Именно для этих параметров рассчитана передаточная характеристика спектрометра, показанная на фиг. 3. Задача получения более коротких сформированных детекторных импульсов, при том что условие (6) выполнено и, соответственно, увеличение быстродействия спектрометра частично решается стандартным образом - укорачиванием показанного на фиг. 6. двухкомпонентного экспоненциального импульса с помощью показанной на фиг. 1 схемы дифференцирования с "компенсацией полюса нулем" (P-Z-differentiator). При этом, в силу того что импульс состоит из двух компонент, на выходе дифференциатора невозможно получить однокомпонентный однополярный импульс с произвольно малой постоянной времени спада. Сцинтилляционная вспышка $LF(t)$ при наличии двух компонент высвечивания в первом приближении описывается выражением (7):

$$LF(t) = E_\gamma \cdot LY \cdot [(A_f/\tau_{df}) \cdot \exp(-t/\tau_{df}) + (A_s/\tau_{ds}) \cdot \exp(-t/\tau_{ds})], \quad (7)$$

где E_γ - энергия, оставленная γ -квантом в веществе сцинтиллятора;

LY - световой выход сцинтиллятора, фотонов на кэВ поглощенной энергии;

A_f и A_s - относительные интенсивности быстрой и медленной компонент;

τ_{df} и τ_{ds} - постоянные времени высвечивания быстрой и медленной компонент.

Импульс тока $I(t)$ на фотокатоде фотоэлектронного умножителя (или иного фотосенсора) описывается такой же по виду функцией с соответствующими коэффициентами:

$$I(t) = E_\gamma \cdot LY \cdot QE \cdot [(A_f/\tau_{df}) \cdot \exp(-t/\tau_{df}) + (A_s/\tau_{ds}) \cdot \exp(-t/\tau_{ds})], \quad (8)$$

где QE - квантовая эффективность фотосенсора.

Если бы импульс тока (или напряжения) представлял собой одну экспоненту, например медленную $I_s(t)$, и описывался бы второй частью выражения (8), то выбрав соответствующим образом параметры дифференциатора, на его выходе получали бы экспоненциальный импульс с уменьшенной в любое число раз постоянной времени $\tau_{out}=R_1 \cdot R_2 C / (R_1 + R_2)$. Действительно, применив преобразование Лапласа, имеем изображение импульса на входе P-Z-дифференциатора:

$$I_s(p) = E_\gamma \cdot LY \cdot QE \cdot A_s / (1 + p\tau_{ds}), \quad (9)$$

где p - комплексная переменная преобразования Лапласа.

Передаточная функция P-Z-дифференциатора в операторном виде дается выражением (10):

$$K(p) = (1 + p\tau_{in}) / (1 + p\tau_{in}/m) \cdot m = (1 + p\tau_{in}) / (1 + p\tau_{out}) \cdot m, \quad (10)$$

где m - коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшается τ_{in} .

Коэффициент m , для показанной на фиг. 1 реализации дифференциатора, равен:

$$m = (R_1 + R_2) / R_2 \quad (11)$$

Если выбрать $R_1 C = \tau_{in} = \tau_{ds}$, то при перемножении (9) и (10) и сокращении скобок в знаменателе (9) и в числителе (10) вновь получается операторная функция, описывающая экспоненциальный сигнал, но уже с постоянной времени τ_{out} , которая в

m раз меньше исходной τ_{ds} . В этом и состоит компенсация полюса (знаменателя) изображения сигнала нулем (числителем) передаточной функции дифференциатора.

В случае, когда импульс представляет собой суперпозицию 2-х и более экспонент, попытка выполнить "короткое" дифференцирование, когда $\tau_{out} \leq \tau_{df}$, приводит лишь к образованию у сигналов выбросов противоположной полярности из-за того, что параметры дифференциатора не согласованы с постоянной времени быстрой экспоненты. Образующийся выброс увеличивает длительность сформированных детекторных импульсов T_w , а быстродействие спектрометра падает. На фиг. 8 показано действие дифференциатора с компенсацией полюса нулем на обе компоненты и на импульс в целом, являющемся их суперпозицией. Строго униполярный импульс получается для $m=1,195$. При этом отрицательный выброс с амплитудой $\approx 1\%$ от V_{max} , образующийся у быстрой компоненты, компенсируется укороченной медленной компонентой. Более сильное укорачивание ($m > 1,195$) приводит к увеличению выброса у быстрой компоненты, образованию отрицательного выброса у суммарного импульса и, следовательно, увеличению его длительности. После интегрирования 3-мя активными интеграторами с $\tau_{int} = \tau_{df} = 225$ нс формируется квазиганссов импульс с параметрами: $T_{peak} = 1,2\tau_{ds}$; $T_w = T_D = 3,0\tau_{ds}$; $T_w/T_{peak} \approx 2,5$. Такие же параметры достигаются в случае, когда исходный импульс имеет только одну, быструю, компоненту. Если исходный импульс тока состоит из большего числа компонент, например 3-х, как в случае сцинтиллятора CsI:Tl [Grodzicka M. et al. Characterization of CsI:Tl at a wide temperature range (-40°C to +22°C). Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. A 707 (2013) 73-79], где $\tau_1 = 730$ нс (47,5%), $\tau_2 = 3,1$ мкс (30%), $\tau_3 = 16$ мкс (22,5%), то однократное укорачивание исходного импульса с компенсацией полюса нулем оказывается неэффективным. Для сбора 95% фотонов необходимо обеспечить $T_{peak} = 1,5\tau_3$, а допустимое значение степени укорачивания без образования выброса составляет величину $m = 1,25$. 3-кратное активное интегрирование с $\tau_{int} = 1,5\tau_2$ дает квазиганссовы импульсы с нужным значением T_{peak} ($1,5\tau_3$) и неважной симметрией - отношение $T_w/T_{peak} \approx 3,1$. Это значительно хуже, чем в случае интегрирования 2-компонентных сигналов от NaI:Tl (здесь $T_w/T_{peak} \approx 2,70$).

Другой недостаток классического сцинтилляционного спектрометра-прототипа [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль V. 15 (2011) №4. с. 429-438] с кристаллами, имеющими несколько компонент высвечивания, связан со значительным изменением под действием температуры постоянных времени высвечивания компонент сцинтилляций (см. фиг. 5, например). На фиг. 9 на основании данных работы [Moszynski M. et al. Temperature dependences of LaBr3(Ce), LaCl3(Ce) and NaI(Tl) scintillators. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. A 568 (2006) 739-751] представлено изменение сформированного детекторного импульса при понижении температуры от комнатной до -22°C (типичная ситуация для портативных γ -спектрометров в полевых условиях, где допустимый нижний предел температуры может быть -25°C).

Можно видеть, что длительность сформированного детекторного импульса T_w , а соответственно и микроскопическое мертвое время T_D увеличиваются в 2 раза, т.е. с понижением температуры в такое же число раз падает быстродействие спектрометра. Это критически много.

Недостатками сцинтилляционного спектрометра - прототипа [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль V. 15 (2011) №4. с. 429-438] являются следующие:

1. При двух и более компонентах высвечивания сцинтиллятора существуют ограничения в допустимой степени укорачивания детекторных импульсов - может быть укорочена только самая медленная компонента и после укорачивания она остается более медленной, чем предыдущая, более быстрая компонента.
 2. Из-за сильной температурной зависимости постоянных времени высвечивания компонент сцинтилляционной вспышки оптимальное укорачивание первичных детекторных импульсов возможно только в узком температурном интервале.
- Задачей изобретения является создание гамма-спектрометра со сцинтилляторами, имеющими несколько компонент высвечивания, в котором энергия сцинтилляционных вспышек максимально полно трансформируется в амплитуды электрических импульсов, чья длительность минимальна для достижения предельного быстродействия и стабильна в широком диапазоне изменения рабочей температуры.

Указанная задача решается тем, что в состав спектрометра, процессор детекторных импульсов которого может содержать схему укорачивания с компенсацией полюса нулем, вводятся дополнительные аналогичные схемы укорачивания с постоянными времени со стороны входов, попарно равными постоянным времени подлежащих укорачиванию экспоненциальных составляющих первичного электрического импульса на выходе оптически сочлененного со сцинтиллятором фотосенсора, при этом постоянные времени со стороны выходов упомянутых схем выбираются большими, чем постоянная времени спада ближайшей более быстрой компоненты для предотвращения образования выброса противоположной полярности, а постоянные времени со стороны входа схем укорачивания, настроенных на экспоненциальные компоненты первичного сигнала, автоматически изменяются при изменении рабочей температуры в соответствии с законами температурного изменения компонент высвечивания сцинтиллятора.

Реализация спектрометра показана на фиг. 10, где приведена одна из возможных конструкций. Заявляемый спектрометр содержит последовательно включенные: детектирующий модуль 1, состоящий из оптически соединенных неорганического сцинтиллятора с двумя или более постоянными высвечивания и вакуумного (PMT) или полупроводникового (SiPM) фотоэлектронного умножителя, а также высоковольтного источника питания фотоумножителя (high voltage source) и датчика температуры сцинтиллятора; линейный усилитель 2; модуль дифференцирования 3, содержащий как минимум один дифференциатор с "компенсацией полюса нулем", чья постоянная времени со стороны входа согласована с постоянной времени высвечивания наиболее медленной компоненты сцинтилляционной вспышки и изменяется в функции от температуры сцинтиллятора синхронно с изменением от температуры упомянутой постоянной высвечивания, а постоянная времени со стороны выхода превышает постоянную времени высвечивания ближайшей более быстрой компоненты; процессор детекторных импульсов 4, включающий в себя дифференциатор с "компенсацией полюса нулем", согласованный по входу с одной из быстрых компонент высвечивания сцинтиллятора, стабилизатор базовой линии, две или три секции активных интеграторов, аналого-цифровой преобразователь, устройство таймирования спектрометрических импульсов, инспектор наложенных импульсов и корректор "мертвого" времени спектрометра; контроллер с интерфейсом 5 для управления процессором детекторных импульсов и двусторонней связи с компьютером.

Главные отличия заявляемого сцинтилляционного γ -спектрометра, показанного на фиг. 10 от спектрометра-прототипа на фиг. 1, состоят в следующем:

1. Введен модуль дифференцирования 3, содержащий один или несколько дифференциаторов с "компенсацией полюса нулем". Общее число дифференциаторов, включая имеющийся в процессоре детекторных импульсов 4, равно числу экспоненциальных составляющих первичного электрического сигнала, подлежащих укорачиванию. Входные постоянные времени каждого из дифференциаторов попарно согласуются с постоянными времени подлежащих укорачиванию компонент первичного электрического импульса, а выходные постоянные времени должны превышать постоянную времени ближайшей более быстрой компоненты импульса.

2. Постоянные времени со стороны входа дифференциаторов, предназначенных для укорачивания медленных компонент импульса, изменяются синхронно и в том же направлении с изменением температуры, что и соответствующие им постоянные времени высвечивания сцинтиллятора. Для этого используется имеющийся в детектирующем модуле датчик температуры сцинтилляционного кристалла и хранящиеся в контроллере 5 таблицы температурных зависимостей величин медленных постоянных высвечивания.

Укорачивание многокомпонентных детекторных импульсов на примере сцинтиллятора NaI:Tl иллюстрируется на фиг. 11.

"P-Z"-дифференциатор 3 на фиг. 10 настроен на медленную компоненту высвечивания сцинтиллятора NaI:Tl, т.е. $\tau_{in1} = \tau_{ds} = 1,1$ мкс. При комнатной температуре его "выходная" постоянная времени $\tau_{out1} = \tau_{ds} / 1,195$, как было описано выше. Начальная часть импульса на его выходе и составляющих его компонент показана на фиг. 11a (повторяет фиг. 8). Второй "P-Z"-дифференциатор, размещенный в данном случае в процессоре детекторных импульсов 4, согласуется с быстрой компонентой высвечивания, т.е. $\tau_{in2} = \tau_{df} = 0,225$ мкс. Условием получения униполярного импульса с минимальной длительностью на выходе этого дифференциатора является $\tau_{out2} = \tau_{df} / 1,25$. Форма импульса на выходе второго "P-Z"-дифференциатора и составляющих его двух компонент приведены на фиг. 11b. Сравнение графиков показывает, что униполярный импульс вновь получается

взаимной компенсацией дважды укороченной униполярной медленной компоненты и отрицательной части дважды укороченной быстрой компоненты, чей переход через ноль после второго укорачивания с коэффициентом $n=1.25$ происходит раньше. Результат - получение более короткого униполярного импульса с эффективной постоянной времени $\tau_{\text{eff}} < \tau_{\text{df}}$. С очень высокой степенью точности можно утверждать, что $\tau_{\text{eff}} = \tau_{\text{df}}/n = 225/1.25 = 180$ нс.

Возможность получения таким путем более коротких и строго униполярных импульсов доказывается математически строго.

Окончательно сформированный детекторный импульс (два "P-Z"-дифференцирования и 3 стадии активного интегрирования) имеет параметры: микроскопическое мертвое время $T_D = T_w = 2.9\tau_{\text{ds}}$; время достижения максимума $T_{\text{peak}} = 1.15$; $T_w/T_{\text{peak}} \approx 2.5$.

При уменьшении температуры окружающей среды, благодаря введенным подстройкам "входных" постоянных времени τ_{in1} и первого τ_{in2} "P-Z"-дифференциаторов по показаниям датчика температуры сцинтилляционного кристалла, обеспечивается постоянство формы сформированных детекторных импульсов на входе аналого-цифрового преобразователя. На фиг. 12 показано влияние температуры сцинтиллятора NaI:Tl ($T = -20^\circ\text{C}$) на форму квазигауссова импульса в следующих условиях: $\tau_{\text{ds}} = 1.6$ мкс, $A_s = 0.6$, $\tau_{\text{df}} = 450$ нс, $A_f = 0.4$ при условиях, когда автоматически подстраиваются постоянные времени обоих дифференциаторов (сплошные линии) и в случае автоподстройки лишь τ_{in1} (пунктирная линия).

Сравнивая данные фиг. 9 и фиг. 12, можно видеть, что температурная автоподстройка постоянной времени только "медленного" дифференциатора 3 на фиг. 10 не обеспечивает полной инвариантности формы импульсов к температурным изменениям постоянных высвечивания сцинтиллятора. Введение в структуру спектрометра второго "P-Z"-дифференциатора с температурной автоподстройкой входной постоянной времени оправдано даже в случае, когда при нормальных условиях форма и длительность импульсов после однократного укорачивания могут считаться удовлетворительными.

Одна из возможных технических реализаций "P-Z"-дифференциатора с управляемой в функции от температуры постоянной времени со стороны входа показана на фиг. 13.

Показанный на схеме "а" резистор R_{adj} выполняет роль переменного делителя импульсного напряжения, поступающего на R_i . При нахождении движка R_{adj} в крайнем верхнем положении $\tau_{\text{in}} = C_d R_i$. При нахождении движка R_{adj} в крайнем нижнем положении $\tau_{\text{in}} = \alpha$, т.е. "P-Z"-дифференциатор превращается в обычный CR-дифференциатор и на его выходе получается униполярный импульс только в одном случае - когда на входе действует бесконечная по времени "ступень" напряжения. На практике всегда стремятся выполнять условие $R_{\text{adj}} \gg R_i$. Этим обеспечивается постоянство "выходной" постоянной времени, определяемой произведением C_d на сопротивление в точке соединения R_i , R_0 и C_d . Буферный каскад изолирует дифференциатор от влияния последующих электронных схем.

Схема "b" совершенно аналогична рассмотренной. Роль резистора R_{adj} здесь выполняет линейный усилитель с программно-управляемым усилением (выпускаются в виде микросхем). При указанных пределах изменения усиления эффективное значение τ_{in} может с определенным шагом меняться в пределах $\tau_{\text{in_eff}} = C_d R_i / (0.2 \div 5)$.

Технический результат применения заявляемого сцинтилляционного гамма-спектрометра состоит в том, что увеличивается быстродействие и расширяется температурный диапазон применения спектрометров со сцинтилляционными кристаллами, имеющими две и более компонент высвечивания со значительной температурной зависимостью постоянных высвечивания.

Перечень фигур графических изображений.

Фиг. 1. Обобщенная структура классического сцинтилляционного γ -спектрометра

Фиг. 2. Определение микроскопического мертвого времени T_D . Стрелками показаны моменты возникновения γ -квантов, инициировавших сформированные детекторные импульсы

Фиг. 3. Передаточная характеристика спектрометра со сцинтиллятором NaI:Tl

Фиг. 4. Температурные зависимости интенсивностей компонент высвечивания NaI:Tl. Fast - быстрая (основная) компонента; superfast - сверхбыстрая компонента; slow - медленная

Фиг. 5. Температурные зависимости постоянных времени высвечивания NaI:Tl

Фиг. 6. Форма вспышки NaI:Tl и нормализованная зависимость числа испущенных фотонов от времени. Время в единицах медленной постоянной высвечивания $\tau_{ds}=1,1$ мкс

Фиг. 7. Сформированный детекторный импульс на выходе 3-го активного интегратора

Фиг. 8. Действие дифференциатора, согласованного с параметрами медленной компоненты на составляющие импульса и на импульс в целом. Показаны основания импульсов. Быстрая компонента описывается 2-мя экспонентами

Фиг. 9. Температурное изменение сформированного импульса с укороченной в 1,195 раза медленной компонентой для спектрометра с кристаллом NaI:Tl: τ_{ds} увеличивается при понижении температуры до -22°C с 1,1 до 1,6 мкс, относительная интенсивность A_s возрастает с 20 до 40% при снижении относительной интенсивности быстрой компоненты с 80 до 60%

Фиг. 10. Структура заявляемого сцинтилляционного γ -спектрометра

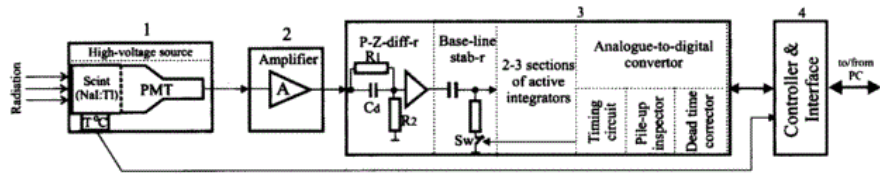
Фиг. 11. Начальные части импульсов после первого (а) и второго (b) укорачиваний. Укороченная быстрая компонента описывается 2-мя экспонентами

Фиг. 12. Нормализованные по амплитуде квазигауссовы импульсы спектрометра с кристаллом NaI:Tl и автоподстройкой входных постоянных времени "P-Z"-дифференциаторов при двух значениях температуры. Сплошная линия - автоподстройка двух дифференциаторов, пунктирная - автоподстройка дифференциатора медленной компоненты

Фиг. 13. "P-Z"-дифференциаторы: стандартная схема с ручной подстройкой "входной" постоянной времени (а) и дифференциатор с программным управлением "входной" постоянной времени (b). A_{adj} - линейный усилитель с программно-управляемым усилением

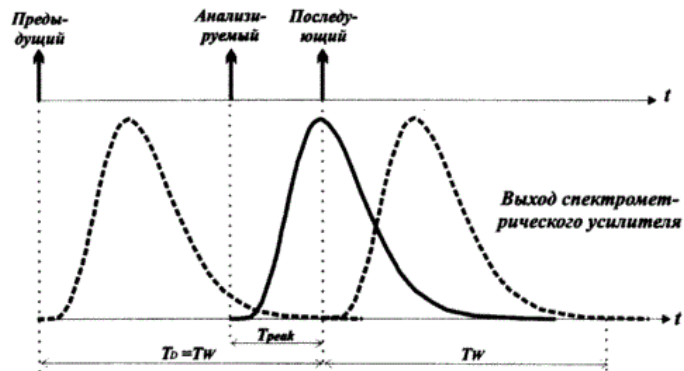
Формула изобретения

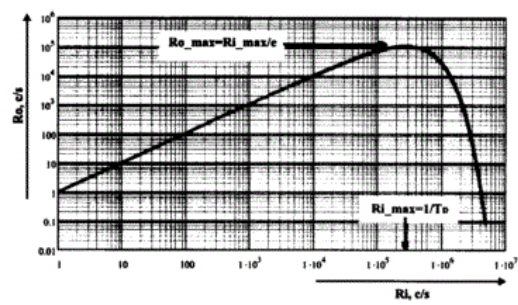
Сцинтилляционный спектрометр ионизирующих излучений, содержащий сцинтилляционный кристалл с несколькими компонентами высвечивания, например CsI:Tl или NaI:Tl; датчик температуры сцинтилляционного кристалла и находящийся в оптическом контакте со сцинтилляционным кристаллом фотосенсор с внутренним усилением, выход которого соединен с низкоомным входом электронного канала, включающего линейный усилитель, процессор детекторных импульсов и контроллер с интерфейсом внешних устройств, отличающийся тем, что между выходом линейного усилителя и аналоговым входом процессора детекторных импульсов включены одна или несколько дифференцирующих цепей "с компенсацией полюса нулем", постоянные времени которых со стороны входов равны попарно постоянным времени высвечивания сцинтиллятора, а постоянные времени со стороны выходов упомянутых схем выбираются большими, чем постоянная времени спада ближайшей более быстрой компоненты, при этом дифференцирующие цепи, настроенные по входам на постоянные высвечивания сцинтиллятора с существенной зависимостью от температуры сцинтиллятора, снабжены устройствами автоматической подстройки по командам контроллера постоянных времени со стороны входа к температурным изменениям упомянутых постоянных времени высвечивания.



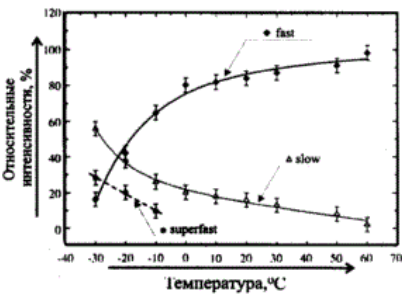
Фиг.1

14

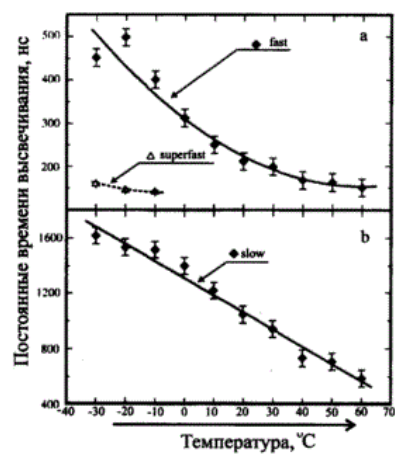




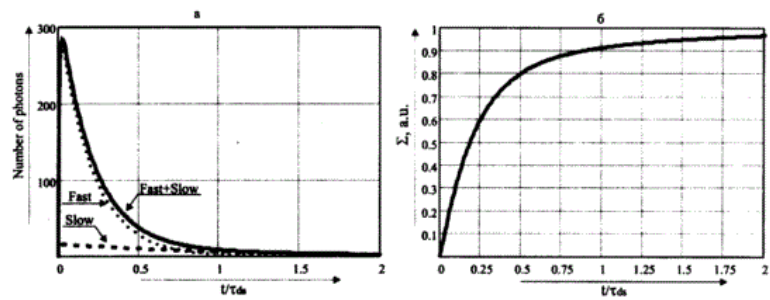
Фиг.3



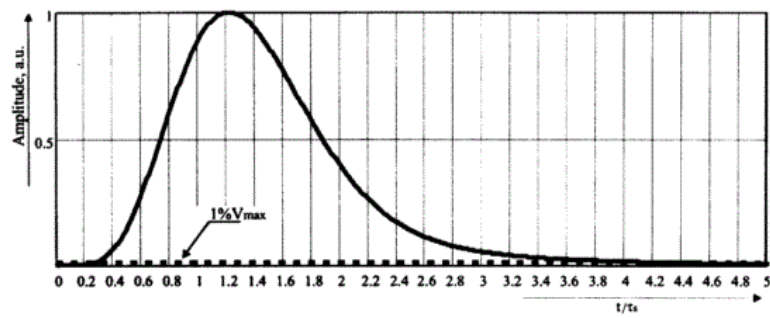
Фиг.4



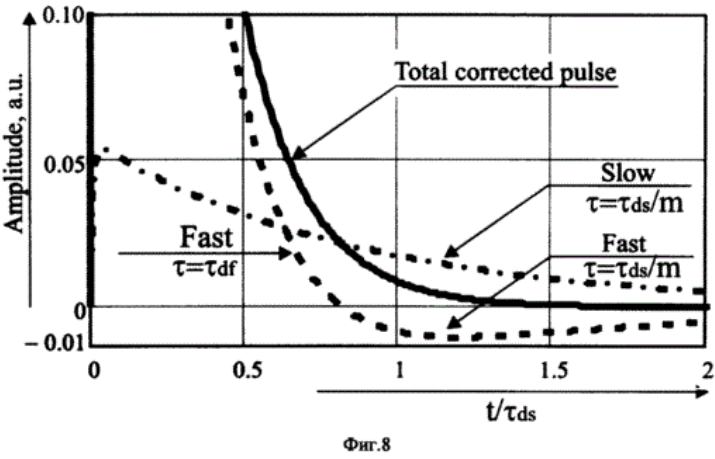
Фиг.5

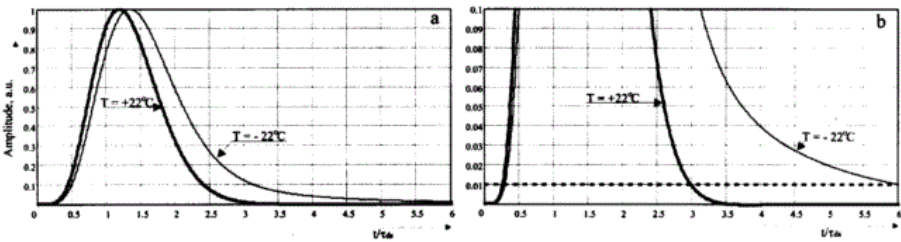


Фиг.6

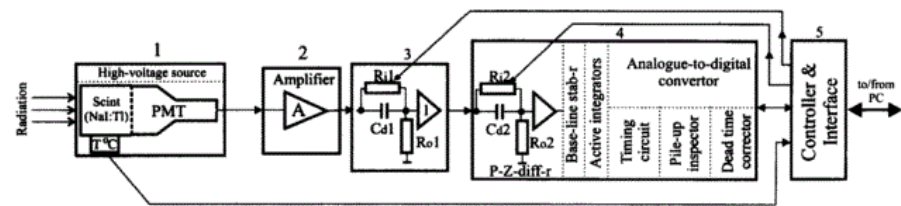


Фиг.7

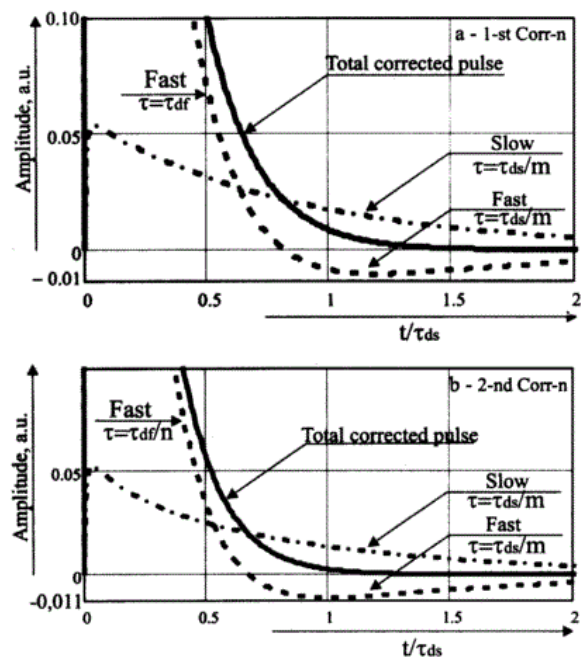




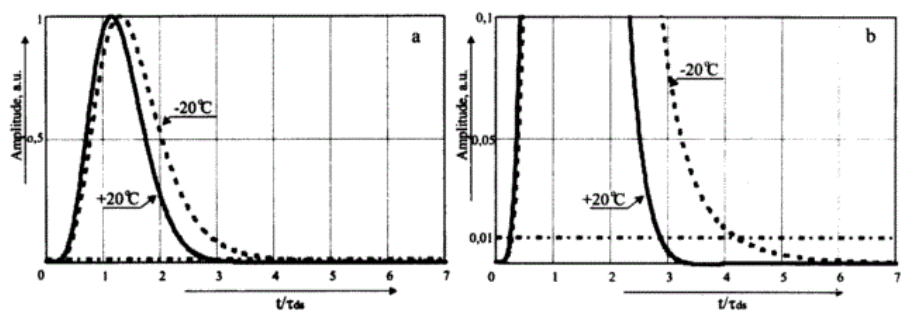
Фиг.9



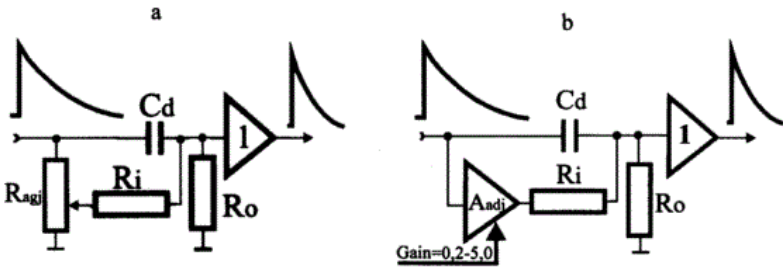
Фиг.10



Фиг.11



Фиг.12



Фиг. 13